

液化石油气储罐对火灾热响应的 CFD 模拟^{*}

邢志祥 常建国 蒋军成

(中国人民武装警察部队学院)

邢志祥等.液化石油气储罐对火灾热响应的 CFD 模拟.天然气工业,2005;25(5):115~117

摘要 液化石油气储罐在火灾作用下,内部的温度和压力将迅速上升,如不能有效控制则会导致储罐爆炸,并酿成危害性更大的二次灾害。为此,介绍了液化石油气储罐在火灾作用下的热响应过程和机理,并应用计算流体力学软件(CFD)对热响应过程进行模拟研究,还对各影响因素对热响应的影响进行了定量模拟分析。分析结果对于安全设计和灭火救援具有参考价值。

关键词 液化石油气 罐 火灾 热 响应 消防 灭火

液化石油气储罐在周围火灾的作用下,贮罐外高温环境通过对流和辐射方式向罐壁传热,罐外壁到罐内壁间以导热方式传递热量。液相热响应包括两个阶段,即自然对流阶段和沸腾传热阶段。自然对流阶段用单相流体的流动和传热方程描述。沸腾传热阶段用两相流体流动和传热方程描述,第二相流体即为气泡。气相热响应模型用单相流体的流动和传热方程描述。液相热响应模型与气相热响应模型是相互耦合的。这些数学模型大多是通用的流体力学基本方程,可以利用计算流体力学(CFD)软件进行求解。Fluent 是可以用于模拟具有复杂外形的流体流动以及传热的计算机程序,它在所有的 CFD 软件中是优化模块最多,计算方法最先进,计算速度、稳定性和精度最佳的软件群。Fluent 中的自然对流模型、湍流模型、辐射模型、传热模型、多相流模型等可以用于热响应模型的求解。

一、模拟计算结果

1. 计算条件

储罐:400 m³ 球罐;储罐内径:9.2 m;充装水平:85%;火灾类型:喷射火焰;燃料为 LPG,质量流量为 85 kg/s。喷射位置在储罐的底部,喷嘴直径 55 mm。初始温度:280 K;初始压力:0.58 MPa;介质:100% 丙烷。

2. 模拟结果

图 1 为模拟得到的储罐内液化气温度随时间响应曲线,可以看出液相温度在气液分界面上温度最高,中部温度最低,底部靠近壁面处温度比其上层液相的温度稍高,液相温度升高速度几乎成直线增加。气相温度在 200 s 前升高速度较快,之后升温速度减小。气相温度在高度方向差别很大,温度分层严重。液相温度可以用三次多项式拟合,气相温度可以用四次多项式拟合,系数取值见图 1 中。气液界面的平均升温速率为 7 °C/min(0.12 °C/s)。气相顶部平均升温速率为 27.4 °C/min(0.456 °C/s)。

图 2 为储罐压力随时间响应,压力随时间的响应可以用二次多项式拟合,平均升压速率为 0.00653 MPa/s。压力升高速率随时间线性增加,其关系为:

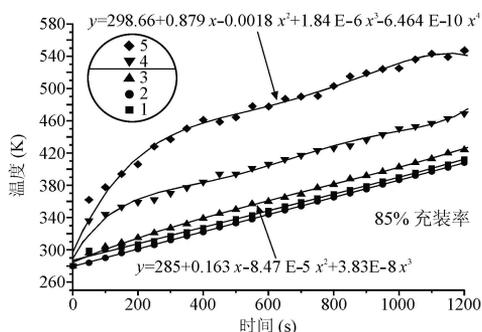


图 1 喷射火焰下球罐内液化气温度响应图

^{*} 本文得到国家自然科学基金资助(No.29936110, No.50206009)。

作者简介:邢志祥,博士,副教授;2004年毕业于南京工业大学安全技术与工程专业,主要研究工业过程安全与评价技术、消防安全工程、消防指挥以及特种灾害的抢险救援技术。地址:(065000)河北省廊坊市武警学院消防指挥系。电话:(0316)2067471,13785656715。E-mail:xingzhixiang@21cn.com

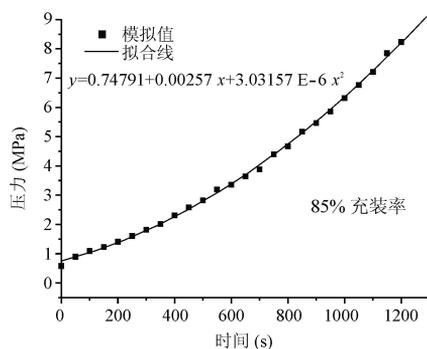


图2 喷射火焰下球罐压力响应图

$$p = 0.748 + 0.00257t + 3.032 \times 10^{-6} t^2 \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = 0.00257 + 6.064 \times 10^{-6} t \quad (2)$$

图3为液相和气相平均壁温随时间变化关系,可以看出气相平均壁温高于液相平均壁温,气相壁温达到900~960 K。液相壁温达到500~600 K。液相壁温和气相壁温随时间的变化关系可以用三次和四次多项式拟合。系数取值如图3所示。

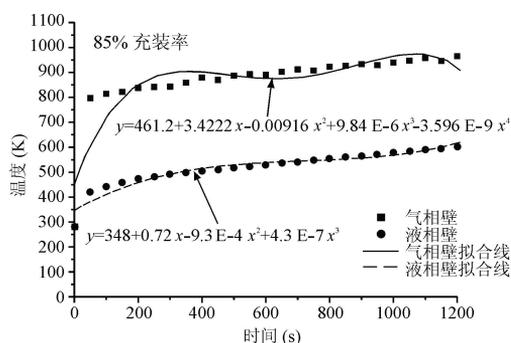


图3 喷射火焰下球罐壁温响应图

二、热响应影响因素分析

1. 火灾类型的影响

以70%充装量的400 m³球罐为例,比较热源功率相同(1000 MW)的喷射火焰和池火灾对热响应的影响。彩色图版5分别为储罐在池火灾和喷射火焰作用下,储罐内部液化气在1000 s时的温度分布。可以看出池火灾下液相和气相温度均低于喷射火焰,喷射火焰下储罐底部喷射火焰作用位置液化气温度较高。

图4为池火灾和喷射火焰下储罐内液化气温度响应的比较。可以看出,在开始100 s内,喷射火焰和池火灾引起的液化气温度升高速率相当,但是随后喷射火焰下液化气温度升高速率比池火灾大。还可以看出,喷射火焰下液相的温度分层比池火灾要

小。主要是由于喷射火焰下储罐底部液体受热直接向上运动,导致液相混合更充分。图5为储罐压力响应的比较。喷射火焰引起储罐内部压力升高速率几乎达到池火灾的2倍。

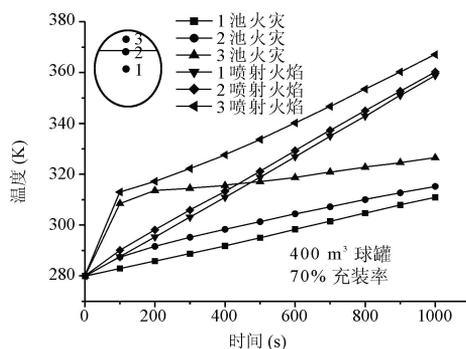


图4 液化气温度响应图

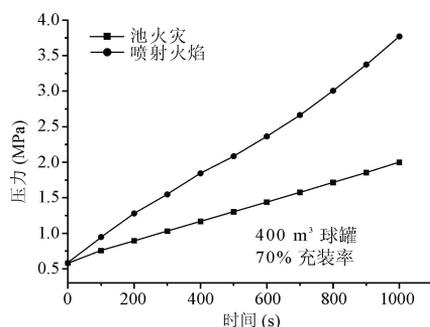


图5 储罐压力响应图

综上所述,在相同热源功率的情况下,液化气储罐在喷射火焰作用下液化气温度、压力随时间增加速率比池火灾大,因此喷射火焰比池火灾更危险。

2. 热流密度的影响

图6为85%充装的400 m³球罐在不同喷射流量的喷射火焰下压力响应。可以看出,喷射流量越大,压力升高速度越快。图7为储罐在内部压力达到安全阀开启压力时内部液化气温度随高度的变化关系。可以看出,喷射流量越大,液相温度分层越

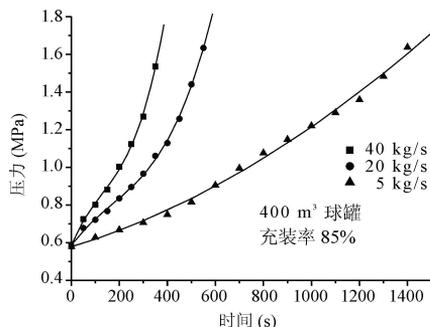


图6 不同喷射火焰下的储罐的压力响应图

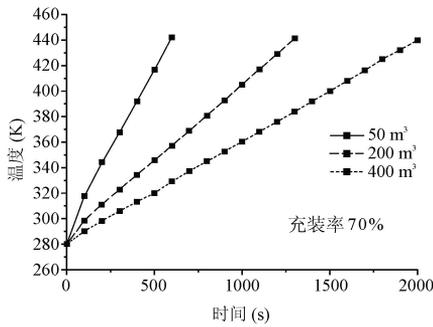


图 7 不同喷射火焰下液化气温度随高度变化关系图

大,气相温度越高。

3. 充装水平的影响

以池火灾作用下 400 m³ 球罐为例,比较充装水平对热响应的影响。图 8、图 9 分别为不同充装水平或不同储罐容积下气液界面上的温度和储罐压力

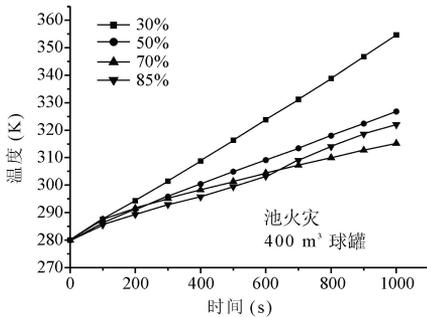


图 8 不同充装水平下气液界面上温度响应图

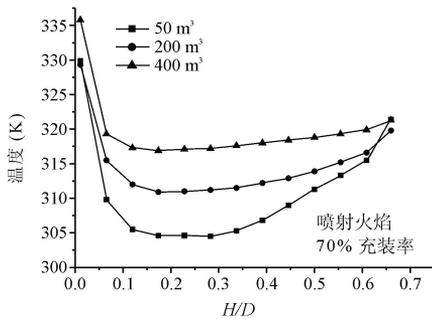


图 9 不同储罐容积下气液界面上压力响应图

随着时间的变化。可以看出充装水平越大,气液界面的温度升高速率越小,压力升高速率越快。

4. 储罐直径的影响

以喷射火焰作用下的 70% 充装率的球形储罐为例,说明储罐直径对储罐热响应的影响。图 8 为储罐内液相顶部温度(气液界面)随时间的变化关系。可以看出储罐直径越大,储罐内温度上升越慢。图 9 为储罐内压力达到 1.6 MPa 时储罐内液相温度随高度位置分布。可以看出液相最高温度在储罐的底

部,液相温度存在热分层,储罐直径越小,热分层越大。

图 10 为几种不同大小的储罐压力响应。可以看出,储罐直径越小,压力升高越快。例如对于 50 m³、200 m³ 和 400 m³ 的球罐,在喷射火焰作用下压力达到 10 MPa 的时间分别为 600 s、1300 s 和 2000 s。

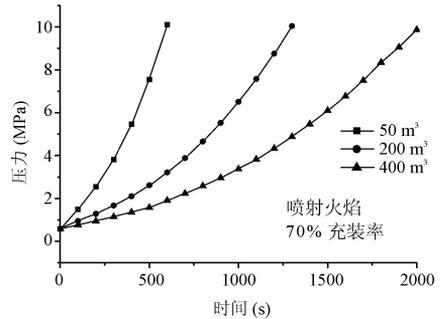


图 10 不同直径储罐的压力响应图

三、结 论

(1) 储罐内压力、温度和储罐壁温度随时间的响应规律可以用多项式进行拟合。多项式的系数取决于初始条件、火灾类型、储罐类型和充装水平等。

(2) 喷射火焰比池火灾的危险性更大,喷射火焰作用下压力升高更快,壁温更高。对于喷射火焰,喷射流量越大,储罐压力升高速度越快,液相温度分层越大,气相温度越高。

(3) 储罐大小对热响应有显著影响,储罐越小,压力升高更快。

(4) 充装水平越大,储罐压力升高速度越大。

参 考 文 献

- 1 邢志祥,蒋军成.液化石油气储罐在火灾下的响应规律研究进展.石油机械,2004;32(3):40~43
- 2 邢志祥,蒋军成.液化气体储罐对火灾的热响应模拟.中国工程热物理学会燃烧学分会 2003 年学术会议论文集,上海,2003;120~128
- 3 Moodie K, Cowley L T *et al*. Fire engulfment tests on a 5 tonne LPG tank. J of Hazardous Materials, 1988;(20): 55—71
- 4 杨世铭编.传热学.北京:高等教育出版社,1980
- 5 邢志祥,蒋军成.液化石油气储罐的热分层和消防安全设计.煤气与热力,2003;23(11):647~650

(修改回稿日期 20005-03-24 编辑 居维清)